

藤原 拓

高知大学教育研究部自然科学系農学部門・教授

気候変動を考慮した農業地域の面的水管理・
カスケード型資源循環システムの構築

§1. 研究実施体制

(1) 「高知大学」グループ

①研究代表者: 藤原 拓 (国立大学法人高知大学教育研究部自然科学系農学部門, 教授)

②研究項目

【G1】資源創出と N₂O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

- ・ ポット栽培試験および実フィールド栽培試験によるクリーニング作物の栽培条件の検討
- ・ 実フィールド栽培試験による面的植物浄化・水再生システムの検証

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

研究①市販光触媒による人尿・家畜尿中の医薬品の分解特性およびその影響因子の検討

- ・ 家畜尿成分の解析と貯留中の組成変化
- ・ イオン液体を用いた製紙スラッジ中に含まれる酸化チタンおよびパルプ成分分離技術の確立
- ・ 酸化チタン吸着剤を合成時の使用薬品の再利用に関する検討

研究②畜産系廃棄物カスケード型循環利用システムの構築

- ・ 家畜糞尿の組成解析と貯留中の性状変化
- ・ 畜産系廃棄物からの資源回収システムの構築
- ・ 畜産廃棄物由来の温室効果ガス排出特性・抑制技術の検討

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発

研究①養殖魚の高付加価値化

- ・ 廃棄物バイオマスの養殖魚飼料における至適添加濃度と有効性についての検討(ブリおよびマダイ)
- ・ 現場海域における実証試験(ブリ)
- ・ 現場海域における実証試験(マダイ)
- ・ クリーニングクropp(ハーブ)の養殖魚飼料における至適添加濃度と有効性の検討

研究②機能紙の開発

- ・ 廃棄物バイオマスからの有用成分利用の検討
- ・ 廃棄物バイオマスを利用した機能紙調製
- ・ 廃棄物バイオマスからの有用成分回収技術の確立
- ・ 廃棄物バイオマスを利用した機能材料開発

研究③高付加価値製品製造プロセスからの廃水処理技術の開発

- ・ 高付加価値製品製造プロセスからの廃水処理技術の開発

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

- ・ モデル地域の土地利用の把握
- ・ 窒素の発生量・処理量の定量化
- ・ G1開発システムの最適配置の検討

(2) 北海道大学グループ

① 主たる共同研究者: 船水 尚行(国立大学法人北海道大学大学院工学研究院, 教授)

② 研究項目

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

研究①: 糞便処理

- ・ コンポスト化過程における水分蒸発速度を考慮したコンポスト型トイレの設計
- ・ 家畜糞のコンポスト化過程における分解と反応のモデル化
- ・ 糞中に含まれる病原性微生物の不活化速度

研究②: 尿処理

- ・ 家畜尿の組成解析と貯留における性質の変化
- ・ ヒドロキシアパタイト(HAP)の晶析による尿中リンの回収
- ・ 晶析法を用いた尿中尿素の回収
- ・ 尿中医薬品の電解処理特性

研究③: 雑排水処理

- ・ 雑排水の小型 MBR 処理装置の設計
- ・ 雑排水の傾斜土層処理装置の設計

(3) 国立環境研究所グループ

① 主たる共同研究者: 山田 正人(独立行政法人国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター, 室長)

② 研究項目

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

- ・ 地域マテリアルフロー(現状)の把握
- ・ 開発技術・システム評価
- ・ 総合評価

(4) 岡山大学(前田)グループ

① 主たる共同研究者: 前田 守弘(国立大学法人岡山大学大学院環境学研究科, 准教授)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

研究①: 面的植物浄化・水再生システムの構築

- ・ 調査圃場における窒素収支の解明
- ・ クリーニング作物の選定
- ・ 休耕田等の水質浄化機能解明
- ・ 窒素収支モデルの開発

(5) 岡山大学(永禮)グループ

① 主たる共同研究者: 永禮 英明(国立大学法人岡山大学大学院環境学研究科, 准教授)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

研究①: セルロース系バイオマス糖化・発酵過程における窒素・リン回収技術の確立

- ・ L-乳酸発酵過程における窒素・リン回収に関する検討
- ・ 乳酸精製過程における窒素・リン回収に関する検討
- ・ セルロース系バイオマスからのL-乳酸発酵プロセスでの窒素・リン回収最適化

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発

研究①: 高付加価値製品製造プロセスからの廃水処理技術の開発

- ・ 高付加価値製品製造プロセスからの廃水処理技術の開発

(6) 京都大学グループ

① 主たる共同研究者: 高岡 昌輝(国立大学法人京都大学大学院工学研究科, 教授)

② 研究項目

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

研究①: 水・バイオマス資源のカスケード型循環システムの開発

- ・ 種々の家畜糞尿の性状, 物性調査
- ・ 家畜糞尿の脱水・乾燥・焼却プロセスに関する実験的検討
- ・ 焼却残渣からのリン回収方法の実験的検討
- ・ 家畜糞尿のカスケード型循環利用システムの総合評価

(7) 鳥取大学グループ

① 主たる共同研究者: 赤尾 聡史 (国立大学法人鳥取大学大学院工学研究科, 助教)

② 研究項目

【G1】資源創出とN₂O排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

研究①: セルロース系バイオマスからのL-乳酸発酵プロセス開発

- ・ バイオマス糖化・発酵条件の最適化
- ・ L-乳酸精製プロセスの検討
- ・ 糖化－発酵－精製全体フローの最適化

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

研究①: 「分散型水・資源再生システム」統合評価に関する研究

- ・ 現状システムの把握と資源分布データベース化
- ・ 要素技術データベースとシステム評価式の試作
- ・ データベースおよび評価式の更新
- ・ 実地域におけるシステム提案と評価
- ・ システム適用条件の検討
- ・ 実地域におけるシナリオ評価支援技術開発

(8) 埼玉県環境科学国際センターグループ

① 主たる共同研究者: 長谷 隆仁 (埼玉県環境科学国際センター資源循環・廃棄物担当, 専門研究員)

② 研究項目

【G4】水・バイオマス資源のカスケード型循環システム」統合評価

- ・ カスケード型循環システムにおける要素技術の評価法
- ・ 要素技術間の資源分配(フロー)システムの評価法
- ・ カスケード型循環システムにおける資源分布・需要分布等の地域制約把握・データベース化
- ・ 要素技術の評価法・資源源分布・需要分布等データベース化の統合化と総合評価

(9) 愛媛大学グループ

① 主たる共同研究者: 深堀 秀史 (国立大学法人愛媛大学農学部, 助教)

② 研究項目

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

- 家畜尿中医薬品の吸着除去
- 尿中医薬品の分解に適した酸化チタン吸着剤合成条件の確立
- 酸化チタン吸着剤を用いた動物用医薬品の分解除去
- 製紙スラッジを原料とした酸化チタン吸着剤合成条件の確立と動物用医薬品の分解除去

§ 2. 研究実施内容

【G1】資源創出と N₂O 排出抑制を同時に実現する面的植物浄化・水再生システムの構築

高知大学農学部のライシメーター設置圃場において、3段階の栽植密度でのクリーニングクロープ栽培試験を春季および冬季に実施し、前年度の結果(平成22年度の夏季栽培試験)と合わせて総合的に検討することで、栽植密度と栽培時期がクリーニング効果に及ぼす影響を評価した。クリーニング効果の評価においては、ガスフラックスや土壌・浸透水・植物体成分情報に加えて、根の吸収機能がもたらす水分動態に基づいた検討を行った。無機態窒素の溶脱量はクリーニングクロープを栽培しない対象区と比較して夏季には88%以上、春季には86%以上削減され、最終目標とする「商品作物収穫後の余剰窒素による硝酸態窒素流出負荷を80%削減する面的浄化システムを確立する」をライシメーター試験で達成した。N₂O放出量は、対象区と比較して夏季には68%以上削減されたが、春季は栽植密度により差があり、標準区では63%削減されたのに対して疎植区では20%削減にとどまった。さらに、夏季に多肥作物栽培後を想定した土壌で栽培試験を行うことにより、トウモロコシによるクリーニング効果のポテンシャルが12.2~17.2 gN/m²程度であることを示した。また、クリーニング効果を機構面から検討するために、植物の蒸発散量を栽植密度との関係において把握した。蒸発散量の大きさを表す作物係数は、栽植密度が大きい場合には2~3と通常取り得る値に比較し非常に大きく、クリーニング効果を維持するためには給水管理が重要であることを示した¹⁾。

クリーニングクロープの導入効果の検証のために、岡山県南東部干拓地内に位置するナス栽培ハウス農家圃場において窒素溶脱およびN₂O発生量を2年間継続してモニタリングした。クリーニングクロープ栽培期間および灌水除塩時における全窒素溶脱量はクリーニングクロープを栽培しない対象区と比較して、平成22年度で86%、平成23年度で69%削減された。一方、N₂O放出量の差は明確ではなかった。さらに、周辺農耕地における窒素収支を算出し²⁾、施肥窒素の約3割が圃場から流出したと推定された。地下水に含まれる硝酸性窒素の除去に電子供与体としてポリ乳酸を用いる技術を検討した。ポリ乳酸の溶解特性を調べた結果、高pHで加水分解速度が大きくなることがわかった。一方、異なるpHでポリ乳酸を用いた脱窒試験を行った結果、高pHでは亜硝酸濃度が上昇し、脱窒反応が阻害された。ポリ乳酸による地下水硝酸汚染の原位置浄化においては脱窒に適したpH範囲での溶解度の制御が課題である。

クリーニングクロープや水生植物等のセルロース系バイオマスからのL-乳酸発酵プロセス開発では、バイオマス糖化の後段プロセスである高温L-乳酸発酵を実施した。発酵の効率化として、通常2工程(糖化と発酵)となるプロセスを1工程(糖化・発酵)とした並行発酵(同時糖化発酵)を実施し、前処理前の乾燥バイオマス(クリーニングクロープ)重量当たり0.15 g/gの収率にてL-乳酸を得た³⁾。ただし、通常工程で行った同0.28 g/gと比べると収率が低いことから、並行発酵に至適な株の探索を継続している。また、カスケード型資源循環システムの思想から農業地域に存在する資材を発酵副資材(糖質以外の材料)として利用するための検討として、発酵に必要な窒素およびリンの糖質中の炭素に対する割合(C/N, C/P)について実験で用い

る代表的な副資材 yeast extract を用いて定めた(C/N 12.5 以下, C/P 153 以下)。同割合をもとに、カツオエキス(カツオ煮熟水を想定)を副資材とする高温 L-乳酸発酵を実施し、L-乳酸収率 0.89 g/g-グルコースを得た。また、平成 22 年度までに実施した発酵の前処理および糖化に関する検討結果を論文として発表した⁴⁾。

セルロース系バイオマスからポリ乳酸を生産する L-乳酸発酵プロセスにおいて、枯渇が予想されるリンを窒素とともに肥料として再利用可能な形態で回収・再資源化する技術(NP 回収技術)の確立を検討している。その結果、破碎した乾燥バイオマス試料を水に浸漬することでリンを 80%程度の割合で抽出し⁵⁾、さらに抽出液にカルシウムを添加することで抽出液中リンのほぼ全量を不溶化し、バイオマス中リンの約 90%を固形物として回収し得ることを示した。この回収率は本研究で最終目標とする回収率 80%を上回り、当初の目標を達成した。

【G2】畜産施設等点源由来の廃水・廃棄物の高度再生システムの開発

低環境負荷型の肉用牛生産技術を提案するため、本年度は、粗飼料の一部にサイレージ化食用カンナ地上部を配合し、肉用牛育成期 21 日間の飼養体系を評価した。その結果、カンナ給餌区は無給餌区と比較して、1 日当たりの飼料摂取量が有意に減少したが増体量には差は認められず、飼料効率の向上が示唆された。

牛糞からのリン回収のために肉牛糞焼却灰や炭化物の組成分析を行った結果、リン濃度はリン鉱石に匹敵するレベルであり、重金属濃度も低かった。しかし、塩素分が 2.5 ~6.0wt%とそのまま肥料利用するのは困難なため、水洗による精製を行ったところ、焼却灰、炭化物中の塩素を 80%以上除去することができ、得られた精製物は種々のリン肥料基準に適合した。さらに、従来の堆肥化プロセスと、自然乾燥-焼却・炭化-水洗によるリン肥料精製プロセス(新プロセス)の温室効果ガス排出量を試算・比較した結果、近距離(10 km)では堆肥化と焼却で概ね同等であったが、遠距離(200 km)での利用を考えた場合、運搬による CO₂ 排出量が大きく影響し、新プロセスが大幅に有利となり、リン資源の広域利用を想定した場合は、熱処理が望ましいことが示唆された。

堆肥化過程の温室効果ガスの発生メカニズムを明らかにするために、ラボスケールの堆肥作成リアクターを構築し、調査を開始した。また、堆肥製造プロセスの把握および圃場での土壌中医薬品の挙動把握のため、北見に実証サイトの態勢を整え、圃場での土壌中医薬品の挙動調査に向けた地域ステークホルダーの理解を深める調整を行った。

糞中に含まれる病原微生物の不活化に関し、石灰投入量と pH、ならびに微生物の不活化速度の関係を実測し、作業時のリスクを一定以下とするための必要添加量の推算法を確立した。また、コンポスト化過程と石灰投入時では微生物への損傷機構が異なることを示した。

固層表面不均一反応により、破碎ホタテ貝殻表面に尿中リン酸を DCPD またはアモルファス状の HAP として回収できることを示し、ホタテ貝殻添加量と生成結晶構造の関係性を求めた。ホルムアルデヒド添加による遅効性窒素肥料(ウレアホルム)の合成法

については、ホルムアルデヒド添加量と窒素回収率の関係を実測し、最適添加条件が存在することを見出した。

雑排水処理水・コンポストの農業利用に関わる質の評価では、界面活性物質濃度と発芽阻害の関係を実験的に検討し、界面活性物質の許容レベルを推算することができた。尿中医薬品を電解酸化処理によって分解可能であることを薬効性ならびに反応中間産物の検出により確認し、電解酸化処理条件の最適条件（陰極と陽極の面積，設置距離）を得た。

平成 22 年度までにサルファ剤の吸着材として高シリカ型ゼオライトが極めて有望であることを明らかにし、これを本年度論文発表した⁶⁾。また、本年度は高シリカ型ゼオライトと酸化チタンの複合体を合成し、動物用医薬品の除去に適用したところ、ゼオライトと酸化チタンの単純混合に比べて効率的に医薬品を除去可能であることが確認された。さらに、酸化チタンを含有した製紙スラッジのパルプ成分と無機成分とをイオン液体を用いて分離⁷⁾し、その無機成分から酸化チタン-ゼオライト複合体を合成した。

【G3】農業系廃棄物からの高付加価値製品創出・水再生システムの開発

廃棄ユズ果皮残渣の高付加価値再資源化を目的とし、ユズ果皮に含まれる精油，ペクチンおよびセルロース成分特有の性質を保った状態で、段階的に抽出するための効率的な抽出方法を検討した。各条件下で抽出された粗ペクチンおよび粗ペクチンのガラクトuron酸含量の関係から、アルカリ条件下では酸抽出に比べペクチンの抽出量が少なく不適であった。酸条件下では、定量時の中性糖の影響から考慮すると、 2×10^{-3} mol 塩酸がペクチンの抽出に最も適した条件であると考えられた。次に抽出したセルロースを比較すると、 2×10^{-1} mol 塩酸において最も抽出量が多い結果となり、他の条件下ではそれほど大きな違いは見られなかった。しかしながら、強酸で処理されたセルロースはセルロースの結合に何らかの影響を与えており、初期状態とは違うセルロースが析出している可能性が高い。このことから、両成分を効率的かつ特有の性質を維持した状態で各成分を抽出する条件としては、 2×10^{-3} mol 塩酸での処理が最適であると考えられた。

ユズ果皮ペーストのブリ用飼料添加剤としての利用に関しては、平成 22 年度までに確認した⁸⁾ユズ果皮の抗酸化効果による褐変抑制効果の獲得に必要な期間を検討した。併せて過酸化脂質の生成量も測定した。その結果、3 週間のユズ果皮添加飼料の給餌によって褐変と過酸化脂質の抑制効果が確認できたが、4 週間のユズ果皮添加飼料の給餌後では褐変抑制効果が消失しており、給餌期間には水温・日長等の環境要因を考慮する必要があると考えられた。さらに、本研究の成果を基に実際の海面生け簀で養殖されているブリ（高知県宿毛湾）で実証試験を行った。その結果、ユズ果皮の飼料への添加によってユズ香気成分のブリ肉質への移行のみが確認でき、抗酸化効果は微弱であった。抗酸化効果を確実に獲得するために次年度に給餌期間の再検討が必要である。マダイにおいては、飼料 1 kg に 50 g までのユズ果皮ペーストの添加は摂餌や成長に悪影響が無

いことを確認した。

マルソウダ煮熟水の養殖魚飼料添加剤への利用では、市販の稚魚用飼料に直接煮汁を浸漬させることで効果を検討し、飼料 1 kg あたり 300 mL の煮汁を浸漬することで、マダイ稚魚とブリ稚魚において成長の有意な向上が確認できた。

【G4】面的水管理・カスケード型資源循環システムの統合評価

高知県内において、主に耕種農業、林業から発生するバイオマス残渣の排出および処理・資源化過程におけるマテリアルフローを資料調査・現地調査等により把握した。また、これらバイオマスの炭素、窒素およびリン含有量等の性状を分析した。以上を、昨年度までに得られたデータと統合し、平成 21 年度実績の静脈系バイオマス投入産出表を示した。

農業に関わる窒素動態を把握するため、施設園芸の盛んな高知市において、統計資料と地理情報を用いて農業集落、園芸施設、200 m 空間格子を単位としてそれぞれで窒素収支を推計した。また昨年度に引き続き、衛星画像を用いた園芸施設の抽出を行った。

システムの評価に利用する情報（既存技術に関する費用関数、環境負荷関数や高知県のバイオマス資源の地理的情報）の収集・整理を行い、このうちバイオマス資源の空間分布については GIS をベースとした推定方法の検討を行った。また、温室効果ガス排出量、資源再生量、費用のいずれかの最小あるいは最大化を目的関数とし、水環境保全を制約条件とした際のシステム最適化問題の定式化を終えた。これの一部を四国の下水汚泥処理システムをモデルケースとした資源再生システムに適用し目的関数や制約条件を変更した分析を行い、費用・温室効果ガス削減条件の検討を行った。

個別要素技術を統合したカスケード型循環システムの評価を行うために、各要素技術において利用可能なバイオマス量を把握すると共に、高知県について地域的制約条件となるバイオマス資源分布等のデータベース整備を行った。また、昨年度開発したバイオマス資源・廃棄物のコスト最適化による最適配分モデルを用いて、既存技術による循環利用の限界と最適配分を示した。さらに、モデルの制約条件として環境負荷を追加するとともに、本チームの開発技術などの要素技術における投入物・産物の収支等を調査し、モジュール化する作業に着手した。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Yasutake, D., Kimura, C., Kondo, K., Inoue, K., Mori, M., Yamane, S., Maeda, M., Nagare, H., Fujiwara, T. (2011) Analyzing evapotranspiration components and crop coefficients for catch crop field with small area at different plant densities in a greenhouse, *Environment Control in Biology*, **49**, 217-225. (DOI: 10.2525/ecb.49.217).
2. 前田守弘, 浅野裕一, 兵藤不二夫, 中島泰弘, 藤原拓, 永禮英明, 赤尾聡史 (2011) 笠岡湾干拓地における水質汚濁現状と安定同位体自然存在比を用いた汚濁機構解析, 土木学会論文集 G(環境), **67(7)**, III_213-III_221.
3. Akao, S., Maeda, K., Nakatani, S., Hosoi, Y., Nagare, H., Maeda, M. and Fujiwara, T. (2012) Comparison of Simultaneous and Separate Processes: Saccharification and Thermophilic L-Lactate Fermentation of Catch Crop and Aquatic Plant Biomass, *Environmental Technology*, (in press).
4. 前田光太郎, 赤尾聡史, 細井由彦, 永禮英明, 前田守弘, 藤原拓 (2011) ソフトバイオマスを原料とした酵素糖化における各種前処理の糖化効率比較, 土木学会論文集 G(環境), **67(7)**, III_433-III_440.
5. 永禮英明, 藤原拓, 赤尾聡史, 前田守弘, 山根信三 (2011) 回収・再資源化を目的としたバイオマスからの元素抽出, 土木学会論文集 G(環境), **67(7)**, III_461-III_466.
6. Fukahori, S., Fujiwara, T., Ito, R., Funamizu, N. (2011) pH-Dependent adsorption of sulfa drugs on high silica zeolite: modeling and kinetic study, *Desalination*, **275**, 237-242. (DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.006).
7. Ichiura, H., Nakatani, T., and Ohtani, H. (2011) Separation of pulp and inorganic materials from paper sludge using ionic liquid and centrifugation, *Chemical Engineering Journal*, **173**, 129-134. (DOI: 10.1016/j.cej.2011.07.048).
8. 深田陽久, 古谷尚大, 益本俊郎 (2012) ユズ果皮ペースト添加飼料を給与したブリ幼魚における血合筋の褐変抑制, 水産増殖(短報), **60(1)**, 135-13